УДК 534.86 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-2-13

Применение моделирования процесса развития аварии и оценки риска в целях обеспечения безопасной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса

К. Н. Абдрахманова, В. В. Шабанова, А. В. Федосов, Н. Х. Абдрахманов

Уфимский государственный нефтяной технический университет (г. Уфа, Российская Федерация)

Введение. Одна из основных задач организации производства — предупреждение аварий. В нефтегазовом комплексе значительная часть аварий происходит на технологических трубопроводах. Разгерметизация технологического трубопровода приводит к негативным последствиям вплоть до полной остановки производства и может стать причиной человеческих жертв. Моделирование процесса разгерметизации трубопровода в соответствии со сценариями аварии представляет собой один из подходов к обеспечению безопасности технологических трубопроводов.
Постановка задачи. Задачей данного исследования является моделирование процесса разгерметизации трубопровода в соответствии со сценариями аварии на производстве при определенных условиях окружающей среды.
Теоретическая часть. В большинстве случаев основными причинами аварий являются внутренние опасные факторы, связанные с разгерметизацией и разрушением технических устройств, а также ошибки персонала, обусловленные нарушением требований организации и производства опасных работ. Единая методика составления сценария развития аварии на опасных производственных объектах отсутствует, а существующие указания по определению возможных сценариев носят рекомендательный характер. При составлении сценариев рассмотрены различные виды огне- и взрывоопасных технологических сред, находящихся внутри трубопровода. Объектом экспериментов была 3D модель участка промышленного объекта с гипотетическим технологическим трубопроводом при таких переменных, как: плотность застройки, метеорологические условия, зоны застоя воздушных масс. Последние моделировались в программном комплексе FlowVision, который визуализирует трехмерные течения жидкости и газа.
Выводы. Разработанный универсальный алгоритм позволил составить сценарии развития аварийной ситуации на гипотетическом технологическом трубопроводе. Результаты применимы для дальнейшего моделирования аварийных ситуаций.

***Ключевые слова*:** авария, моделирование, риск, технологический трубопровод, разгерметизация, нефтегазовая отрасль, производство, безопасная эксплуатация.

***Для цитирования*:** Применение моделирования процесса развития аварии и оценки риска в целях обеспечения безопасной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса / К. Н. Абдрахманова, В. В. Шабанова, А. В. Федосов, Н. Х. Абдрахманов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — №2. — С. 2–13. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-2-13

Application of emergency process development modeling and risk assessment to ensure safe operation of oil and gas industrial facilities

K. N. Abdrakhmanova, V. V. Shabanova, A. V. Fedosov, N. Kh. Abdrakhmanov

Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Introduction. One of the main tasks of the production organization is to prevent accidents. In the oil and gas industry, a significant part of accidents occur on process pipelines. Depressurization of the process pipeline leads to negative consequences up to a complete shutdown of production and can cause human casualties. Modeling the pipeline depressurization process in accordance with accident scenarios is one of the approaches to ensuring the safety of technological pipelines.
Problem Statement. The purpose of this study is to model the process of pipeline depressurization in accordance with scenarios of industrial accidents under certain environmental conditions.

Theoretical Part. In most cases, the main causes of accidents are internal hazards associated with depressurization and destruction of technical devices, as well as personnel errors due to violation of the requirements of the organization and production of hazardous work. There is no unified methodology for drawing up a scenario for the development of accidents at hazardous production facilities, and the existing guidelines for determining possible scenarios are of a recommendatory nature. Various types of fire and explosive process media located inside the pipeline are considered in the preparation of scenarios. The object of experiments was a 3D model of an industrial site with a hypothetical process pipeline under such variables as building density, meteorological conditions, and air mass stagnation zones. The latter were modeled in the FlowVision software package, which visualizes three-dimensional liquid and gas flows.
Conclusion. The developed universal algorithm made it possible to create scenarios for the development of an emergency situation on a hypothetical process pipeline. The results are applicable for further modeling of emergency situations.

Keywords: accident, modeling, risk, process pipeline, depressurization, oil and gas industry, production, safe operation.

For citation: Abdrakhmanova K. N., Shabanova V. V., Fedosov A. V., Abdrakhmanov N. Kh. Application of emergency process development modeling and risk assessment to ensure safe operation of oil and gas industrial facilities: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020;2: 2‒13. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-2-13

Введение. Аварии на предприятиях нефтегазовой отрасли, как правило, характеризуются значительными выбросами опасных веществ, которые негативно воздействуют на окружающую природную и социальную среду, приносят серьезный экономический ущерб, опасны для здоровья и жизни людей.

В большинстве случаев такие инциденты провоцируют внутренние опасные факторы. Ниже перечислены основные из них:

— разгерметизация и разрушение технических устройств,
— ошибки персонала,
— нарушение требований организации и выполнения опасных видов работ [1–3].

Невозможно полностью исключить аварии на опасных производственных объектах. Именно поэтому сохраняется актуальность проблем предупреждения возникновения аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли, а также исключения тяжелых последствий таких событий [4]. Кроме того, представляет интерес предупреждение аварий на стадии образования дефекта.

Аварии на технологических трубопроводах. В нефтегазовом комплексе большая часть аварий происходит на технологических трубопроводах. Анализ причин и последствий аварийных ситуаций на отечественных технологических трубопроводах позволил выявить основные источники рисков: неудовлетворительное состояние оборудования, коррозия, утонение толщины стенок, нарушение требований промышленной безопасности и человеческий фактор. Некоторые предприятия эксплуатируются многие десятилетия и укомплектованы устаревшим оборудованием с серьезными дефектами.

Разгерметизация технологического трубопровода приводит к негативным последствиям вплоть до полной остановки производства и может стать причиной человеческих жертв.

Постановка задачи. Одно из направлений обеспечения безопасности технологических трубопроводов — моделирование процесса разгерметизации в соответствии со сценариями аварии. Такой подход позволяет определить наиболее уязвимые, критически важные с точки зрения безопасности места трубопровода [3, 5]. Задачей данного исследования является моделирование процесса разгерметизации трубопровода в соответствии со сценариями аварии на производстве при определенных условиях окружающей среды.

Теоретическая часть

Моделирование аварийных ситуаций. В рамках анализа рисков на опасном производственном объекте (ОПО) могут быть определены сценарии развития аварийной ситуации (рис. 1).

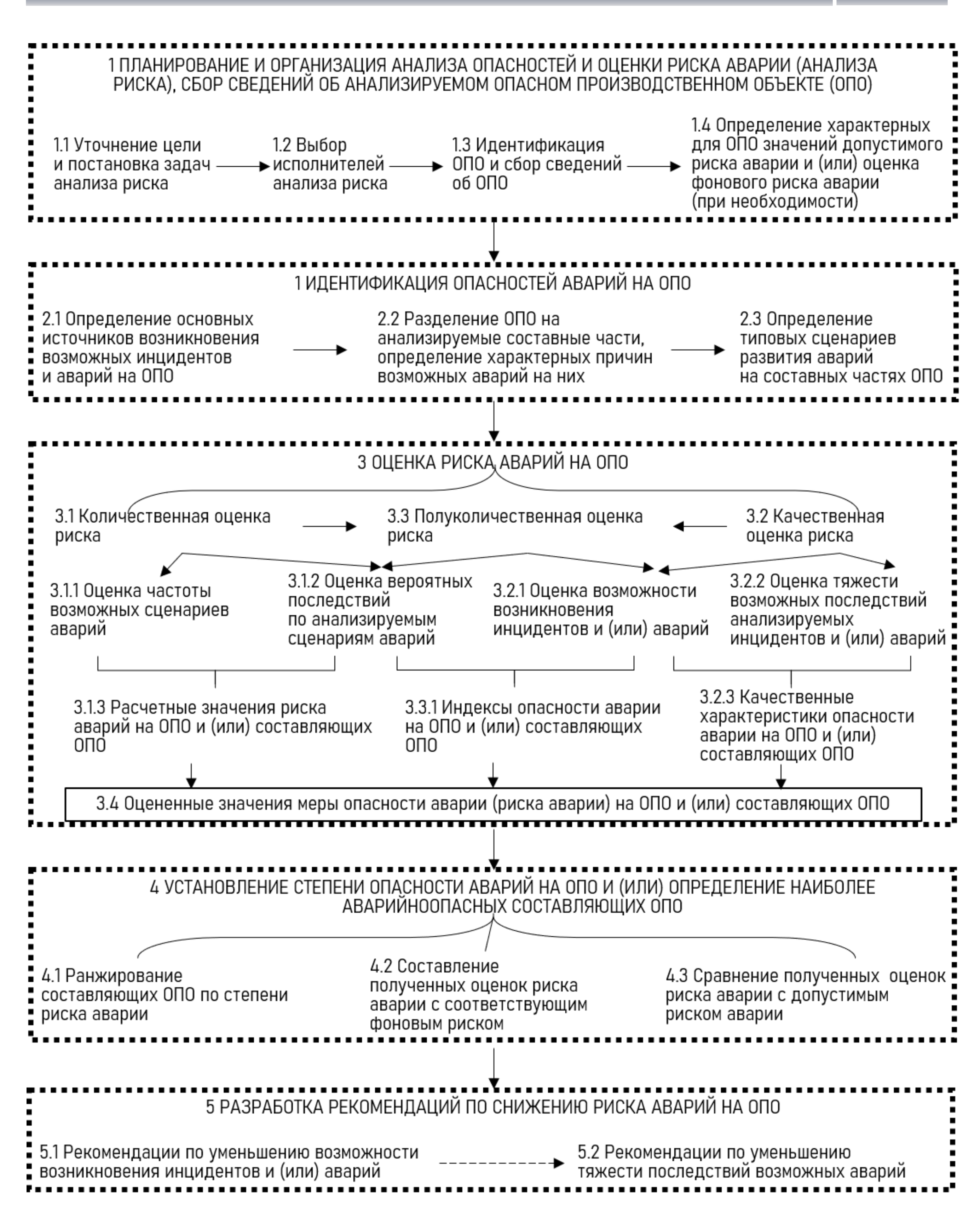


Рис. 1. Общая схема анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО

Единая методика составления сценария развития аварии на опасных производственных объектах отсутствует, а существующие указания носят рекомендательный характер. Разработанный алгоритм составления сценариев развития аварийной ситуации, представленный на рис. 2, может быть применен при оценке риска на ОПО [6, 7].

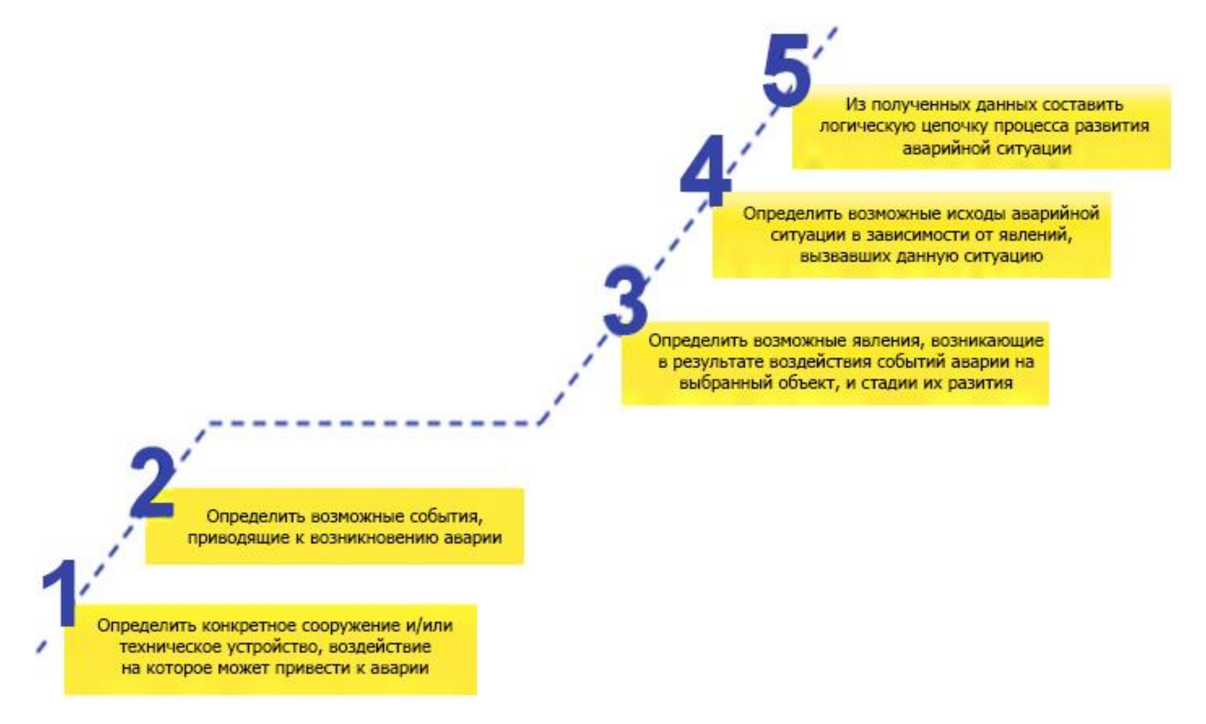


Рис. 2. Алгоритм составления сценариев развития аварийной ситуации

Разработанный алгоритм был применен при составлении сценариев развития аварийной ситуации на гипотетическом технологическом трубопроводе (он рассматривается как объект, воздействие на который может привести к возникновению аварии). При составлении сценариев (рис. 3, 4) рассмотрены различные виды технологических огне- и взрывоопасных сред, находящихся внутри трубопровода. Было определено, что наличие любой группы технологической среды в трубопроводе в общем случае не влияет на изменение цепочки событий, происходящих во время аварии [8, 9].





Рис. 3. Сценарии развития аварийной ситуации при полном разрушении технологического трубопровода





Рис. 4. Сценарии развития аварийной ситуации при частичном разрушении технологического трубопровода

Согласно данным рис. 3–4, разгерметизация технологического трубопровода — причина пролива продукта. Из-за пролива, в свою очередь, образуется парогазовоздушная смесь. Моделирование напряженного состояния с учетом фактического состояния трубопровода может дать более подробную информацию о возможном проливе.

Образовавшееся облако будет дрейфовать вдоль поверхности земли до тех пор, пока не найдется источник воспламенения. При этом будут образовываться места скопления газа — зоны застоя, размеры которых в основном зависят от условий окружающей среды, рельефа местности и плотности застройки. С целью предупреждения аварий необходимо разработать и внедрить в производственную практику модели развития аварийных ситуаций с учетом плотности застройки и метеорологических условий на конкретном объекте [10, 11].

Метеорологические характеристики как один из основных факторов горения углеводородов определяют масштабы ущерба. Учет метеорологических условий, возможных направлений и скоростей ветра значительно увеличивает число вариантов распространения взрывопожароопасных веществ в атмосфере.

Для приближенной оценки скорости ветра по его воздействию на наземные предметы Всемирная метеорологическая организация приняла шкалу Бофорта (рис. 5).

Баллы Бофорта	Словесное определение силы ветра	Средняя скорость ветра, м/с	Средняя скорость ветра, км/ч	Действие ветра на суше
0	Штиль	0—0,2	< 1	Безветрие. Дым поднимается вертикально, листья деревьев неподвижны
1	Тихий	0,3—1,5	1—5	Направление ветра заметно по относу дыма, но не по флюгеру
2	Лёгкий	1,6—3,3	6—11	Движение ветра ощущается лицом, шелестят листья, приводится в движение флюгер
3	Слабый	3,4—5,4	12—19	Листья и тонкие ветви деревьев всё время колышутся, ветер развевает лёгкие флаги
4	Умеренный	5,5—7,9	20—28	Ветер поднимает пыль и мусор, приводит в движение тонкие ветви деревьев
5	Свежий	8,0—10,7	29—38	Качаются тонкие стволы деревьев, движение ветра ощущается рукой
6	Сильный	10,8—13,8	39—48	Качаются толстые сучья деревьев, гудят телеграфные провода
7	Крепкий	13,9—17,1	50—61	Качаются стволы деревьев
8	Очень крепкий	17,2—20,7	62—74	Ветер ломает сучья деревьев, идти против ветра очень трудно
9	Шторм	20,8—24,4	75—88	Небольшие повреждения, ветер начинает разрушать крыши зданий
10	Сильный шторм	24,5—28,4	89—102	Значительные разрушения строений, ветер вырывает деревья с корнем
11	Жестокий шторм	28,5—32,6	103—117	Большие разрушения на значительном пространстве. Наблюдается очень редко.
12	Ураган	33	118	Огромные разрушения, серьезно повреждены здания, строения и дома, деревья вырваны с корнями, растительность уничтожена. Случай очень редкий.

Рис. 5. Шкала Бофорта

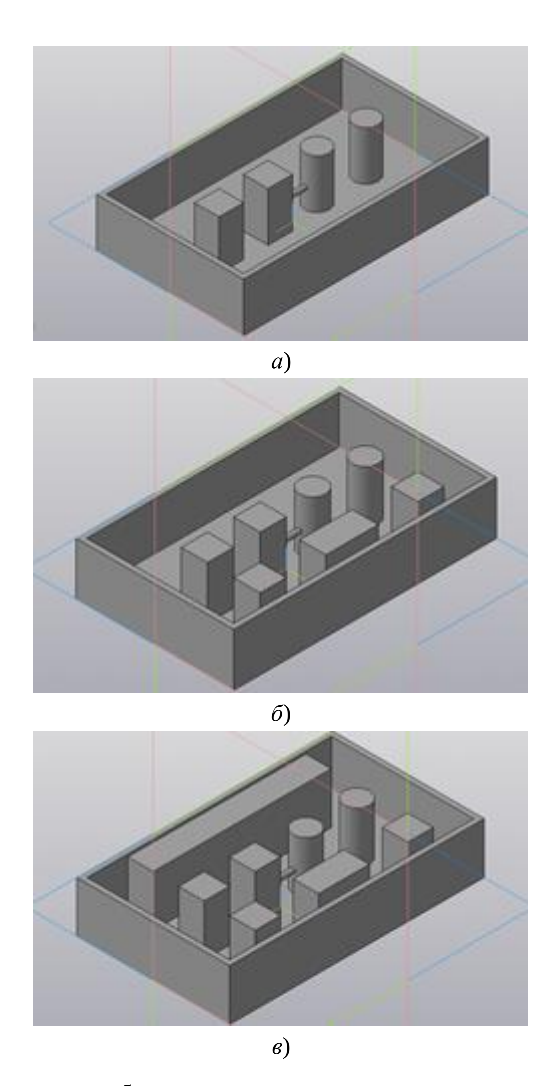
Плотность застройки — один из важных факторов оценки риска и прогнозирования аварийных ситуаций на опасных производственных объектах.

Плотность застройки — это отношение площади застройки к площади предприятия в пределах ограды. Иными словами, под плотностью застройки понимается интенсивность использования территории. Как правило, для объектов нефтегазового комплекса минимальная плотность застройки — около 45 %.

Очевидно, что плотность застройки существенно влияет на развитие аварийной ситуации. Именно поэтому при прогнозировании и оценке рисков рекомендуется учитывать и метеорологические условия, и плотность застройки. В рамках данной работы также определен наихудший вариант направления ветра. Создана 3D модель участка промышленного объекта, а затем на ней смоделированы направления воздушных потоков [12, 13].

Модель участка промышленного объекта строилась в системе трехмерного проектирования «Компас-3D». Для этого последовательно создаются: деталь; параллелепипед; эскизы зданий, сооружений, оборудования.

В рамках исследования созданы три условные модели участка с гипотетическим технологическим трубопроводом, который соединяет два объекта (рис. 6).



а)

б)

в)

Рис. 6. Модели участка промышленного объекта с гипотетическим технологическим трубопроводом: минимальная плотность застройки (*а*), средняя (*б*), высокая (*в*)

На участке с минимальной плотностью застройки при неблагоприятных метеоусловиях внешняя среда оказывает максимальное воздействие на трубопровод. При тех же условиях и средней плотности застройки трубопровод подвергается частичному воздействию внешней среды. Соответственно, максимально плотная застройка обеспечивает минимальное воздействие на объект.

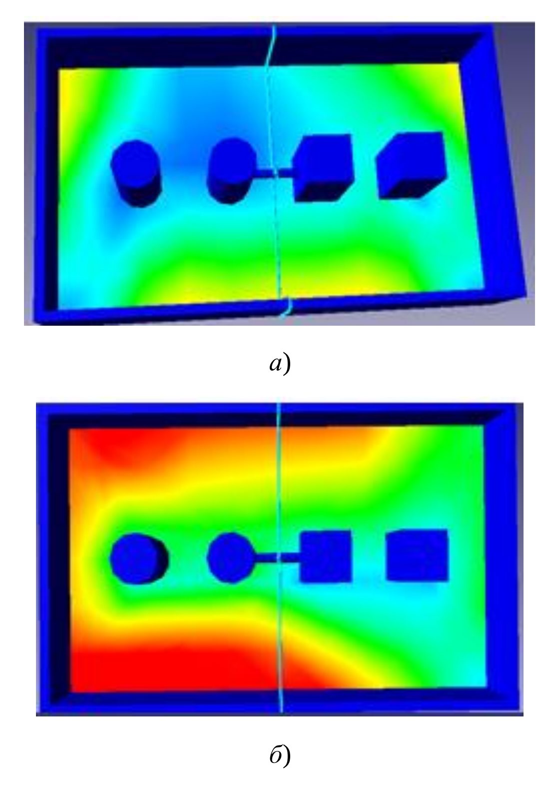
На заключительном этапе моделирования прорабатываются зоны застоя воздушных масс. Для этого используется программный комплекс FlowVision, визуализирующий трехмерные течения жидкости и газа в технических и природных объектах [14].

В качестве математической модели задана несжимаемая жидкость. Выбранное вещество — воздух.

Для создания моделей воздушных потоков использованы 3D модели участков промышленного объекта с различной плотностью застройки — минимальной, средней и максимальной.

Заданная скорость ветра соответствует 3 баллам по шкале Бофорта (5 м/с). В соответствии с заданными параметрами «вход», «выход» и «стенка» воздушные массы будут входить в модель с определенной плотностью застройки и выходить из нее. В работе рассмотрены модели направления воздушных потоков со всех сторон света, поэтому граничные условия меняются в зависимости от направления ветра.

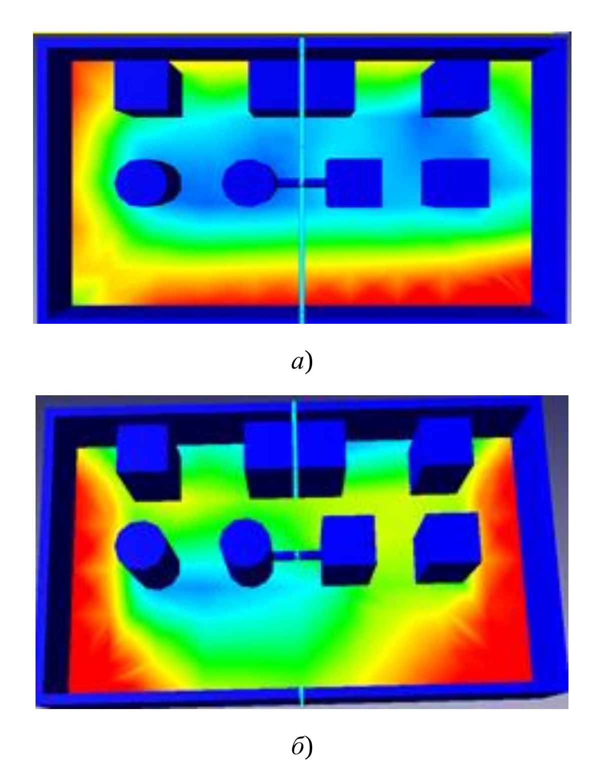
Во всех полученных во FlowVision моделях зоны застоя воздуха отличаются спектром холодных цветов: от темно-синего до светло-голубого (рис. 7–9) [15].



а)

б)

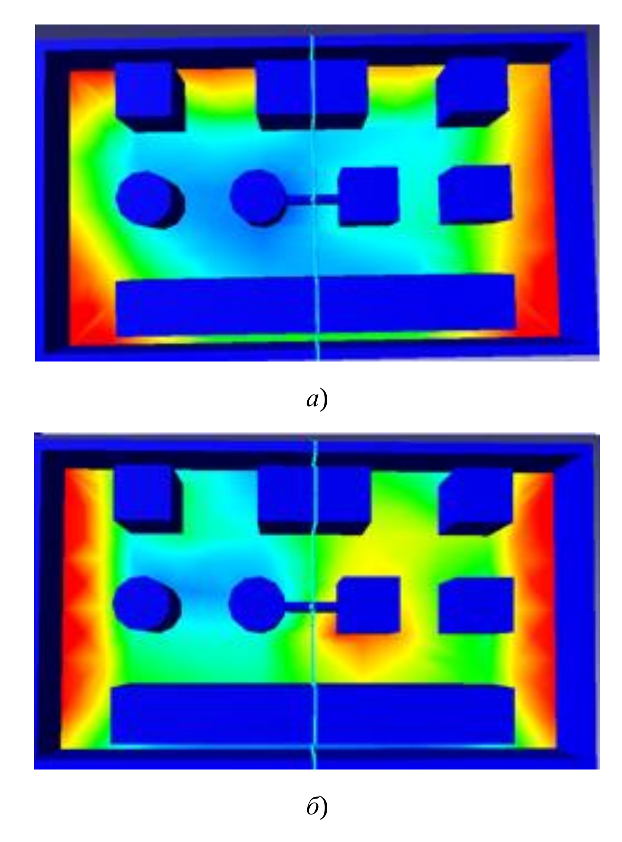
Рис. 7. Модели направления воздушных потоков на участке промышленного объекта с минимальной плотностью застройки с наибольшим (*а*) и наименьшим (*б*) количеством зон застоев воздушных масс



а)

б)

Рис. 8. Модели направления воздушных потоков на участке промышленного объекта со средней плотностью застройки с наибольшим (*а*) и наименьшим (*б*) количеством зон застоев воздушных масс



а)

б)

Рис. 9. Модели направления воздушных потоков на участке промышленного объекта с максимальной плотностью застройки с наибольшим (*а*) и наименьшим (*б*) количеством зон застоев воздушных масс

В данной работе получены 24 модели участка промышленного объекта с различным направлением ветра в зависимости от сторон света. Из них:

— 8 с минимальной плотностью застройки,

— 8 со средней плотностью застройки,

— 8 с максимальной плотностью застройки.

Количество проведенных экспериментов превысило 50.

При оценке полученных результатов предполагалось, что объект подвергается наибольшему поражению при максимальном числе зон застоя воздушных масс (сравниваются модели с одинаковой плотностью застройки). При минимальном количестве зон застоя масштаб аварии увеличится, затронув большую по площади территорию.

Сравнивая спроектированные в FlowVision модели, можно сделать приведенные ниже утверждения.

Технологический трубопровод и окружающая его территория подвержены наименьшему поражению, если пожар пролива возник на участке с минимальной плотностью застройки при воздушных потоках с юга на север. При направлении воздушных потоков с севера на запад масштаб аварии увеличится, затронув большую по площади территорию.

Если рассматривается средняя плотность застройки, то наибольшее количество зон застоя воздушных масс будет в модели с направлением ветра с запада на восток. Модель с направлением воздушных потоков с севера на юг обладает наименьшим числом зон застоя, что соответствует большей площади разрушений в результате пожара пролива.

При максимальной плотности застройки наибольшее число зон застоя воздушных масс имеет модель с направлением ветра с востока на запад, наименьшее — с направлением ветра с юга на север.

Выводы. Результаты опытов позволяют сделать следующие выводы. Количество зон застоя воздушных масс во всех моделях зависит, в первую очередь, от направления ветра. При этом не установлено существование четкой зависимости количества зон застоя воздушных масс от конкретного направления ветра. Это значит, что при расположении оборудования, в том числе технологических трубопроводов, зданий и т. д. на промышленных предприятиях следует учитывать наиболее вероятные направления ветров в определенные периоды года (лето, зима). Кроме того, подтверждается необходимость составления розы ветров для конкретного региона, местности, на которой будет расположен промышленный объект.

Моделируя развитие аварии при разгерметизации технологического трубопровода, важно учитывать не только метеорологические условия, соответствующие данному региону, но и плотность застройки предприятия.

Библиографический список

1. Гражданкин, А. И. Исследование аварий в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности США. Правовая практика и уроки / А. И. Гражданкин, А. С. Печеркин, В. И. Сидоров // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 7. — С. 58–66.

2. Improving the functioning of the integrated system for managing labor and industrial safety in the oil and gas industry / N. Kh. Abdrakhmanov, G. A. Sharipov, A. V. Fedosov [et al.] // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. — 2019. — № 5. — С. 184–190.

3.Assessment of the human factor influence on the accident initiation in the oil and gas industry / F. V. Fedosov, A. N. Khamitova, K. N. Abdrakhmanova, N. Kh. Abdrakhmanov // Территория Нефтегаз. — 2018. — № 1–2. — С. 62–70.

4. Техногенный риск и управление промышленной безопасностью нефтеперерабатывающих предприятий / М. Х. Хуснияров, А. П. Веревкин, И. Р. Кузеев [и др.]. — Уфа : Нефтегазовое дело. — 2012. — 311 с.

5. Принципы разработки информационной модели управления минимизацией рисков опасных производственных объектов нефтегазового комплекса / Н. Х. Абдрахманов, Н. В. Шутов, К. Н. Абдрахманова [и др.] // Нефтегазовое дело. — 2014. — № 4. — С. 353–367.

6. Информационные модели управления минимизацией рисков потенциально опасных производственных объектов / Н. Х. Абдрахманов, Р. А. Шайбаков, А. Г. Марков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 2. — С. 729–736.

7. Количественная оценка неопределенности результатов анализа риска техногенных аварий / А. В. Федосов, И. И. Бадртдинова, К. Н. Абдрахманова, Д. Ю. Валекжанин // Нефтегазовое дело. — 2019. — № 3. — С. 46–66. DOI: http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2019–3–46–66.

8. Повышение безопасности эксплуатации газопроводов / Н. Х. Абдрахманов, В. М. Давлетов, К. Н. Абдрахманова [и др.] // Нефтегазовое дело. — 2016. — Т. 14, № 3. — С. 183–187.

9. Жулина, С. А. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах / С. А. Жулина, М. В. Лисанов, А. В. Савина // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 1. — С. 50–55.

10. Печёркин, А. С. Фоновые показатели аварийности — индикаторы эффективности введения инструментов регулирования промышленной безопасности / А. С. Печёркин, А. И. Гражданкин // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 5. — С. 5–8.

11. Organization of safe management of fire operations on gas pipelines / N. Kh. Abdrakhmanov, A. V. Fedosov, R. A. Shaibakov [et al.] // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. — 2019. — № 6 (382). — С. 272–279.

12. Банников, В. В. Моделирование последствий аварий на опасных производственных объектах с использованием программного комплекса FLACS / В. В. Банников, Т. В. Савицкая // Успехи в химии и химической технологии. — 2016. — № 4. — С. 24–26.

13. Диагностирование вертикальных стальных резервуаров как инструмент повышения безопасности эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли / А. В. Федосов, Н. Х. Абдрахманов, Н. В. Вадулина [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330, № 12. — С. 75–81.

14. Марухленко, А. Л. Учебные курсы по 3D-моделированию последствий аварий с использованием программного комплекса FLACS / А. Л. Марухленко, А. А. Агапов // Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 2. — С. 78–79.

15. Боровков, А. И. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, В. М. Марусева // Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ. — URL: http://fea.ru/news/6721 (дата обращения : 12.11.2019).

Сдана в редакцию 20.03.2020
Запланирована в номер 22.04.2020

Об авторах:

Абдрахманова Карина Наилевна, аспирант кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, РФ, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), ORCID: https://orcid.org/0000–0002–5238–6473, akarinan@mail.ru

Шабанова Вилена Венеровна, студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, РФ, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), ORCID: https://orcid.org/0000–0001–7838–7186, vilena-shabanova@yandex.ru

Федосов Артем Васильевич, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, РФ, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000–0002–7853–1800, fedsv-artem@rambler.ru

Абдрахманов Наиль Хадитович, заведующий кафедрой «Промышленная безопасность и охрана труда» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, РФ, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000–0002–3184–1975, anailx@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

К. Н. Абдрахманова и В. В. Шабанова — экспериментальные исследования и патентный анализ. А. В. Федосов — литературный, патентный анализ и участие в теоретическом исследовании. Н. Х. Абдрахманов — формулирование основной идеи исследования и структуры статьи, редактирование.

Submitted 20.03.2020
Scheduled in the issue 22.04.2020

Information about the authors:

Abdrakhmanova, Karina N., Post-graduate student, Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, RF) ORCID: https://orcid.org/0000–0002–5238–6473, akarinan@mail.ru

Shabanova, Vilena V., Student, Department of Industrial Safety and Labor Protection, Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, RF), ORCID: https://orcid.org/0000–0001–7838–7186, rener06@rambler.ru

Fedosov, Artem V., Associate Professor, Department of Industrial Safety and Labor Protection, Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, RF), Cand. Sci., ORCID: https://orcid.org/0000–0002–7853–1800, fedsv-artem@rambler.ru

Abdrakhmanov, Nail Kh., Head, Department of Industrial Safety and Labor Protection, Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, RF), Dr. Sci., Professor, ORCID: https://orcid.org/0000–0002–3184–1975, anailx@mail.ru

Contribution of the authors:

K. N. Abdrakhmanova and V. V. Shabanova — experimental research and patent analysis. A. V. Fedosov — literary, patent analysis and participation in theoretical research. N. Kh. Abdrakhmanov — formulation of the main idea of research and article structure, editing.